



ArcheoSciences

Revue d'archéométrie

32 | 2008

Varia

Techniques de décoration sans apport de matière par mesure optique sans contact de l'état de surface : première approche aux bijoux mérovingiens

Decoration techniques without material addition by non-contact optical surface characterisation: first approach to Merovingian jewellery

Cécile Esquès, Maria Filomena Guerra, Emmanuel Plé et Françoise Stutz



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/974>

DOI : 10.4000/archeosciences.974

ISBN : 978-2-7535-1597-0

ISSN : 2104-3728

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 31 décembre 2008

Pagination : 71-81

ISBN : 978-2-7535-0868-2

ISSN : 1960-1360

Référence électronique

Cécile Esquès, Maria Filomena Guerra, Emmanuel Plé et Françoise Stutz, « Techniques de décoration sans apport de matière par mesure optique sans contact de l'état de surface : première approche aux bijoux mérovingiens », *ArcheoSciences* [En ligne], 32 | 2008, mis en ligne le 31 décembre 2011, consulté le 01 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/974> ; DOI : 10.4000/archeosciences.974

Techniques de décoration sans apport de matière par mesure optique sans contact de l'état de surface : première approche aux bijoux mérovingiens

*Decoration techniques without material addition by non-contact optical surface
characterisation: first approach to Merovingian jewellery*

Cécile ESQUÈS*, Maria-Filomena GUERRA*,
Emmanuel PLÉ* et Françoise STUTZ**

Résumé : Un protocole de mesure topographique de surface, sans contact, par imagerie confocale à champ étendu, a été appliquée pour la première fois à l'analyse de traces d'outils en orfèvrerie dans le but de déterminer la technique de décoration et le type d'outil employés ainsi que le geste de l'orfèvre. Dans le cadre de cette étude nous nous sommes intéressés aux techniques de décoration sans apport de matière (par déformation plastique ou enlèvement de matière) et plus particulièrement à la gravure, à la ciselure et à l'estampage. Des motifs gravés et ciselés produits en atelier d'orfèvre ont servi de support à la mise au point et au test d'un protocole. La technique a été appliquée à l'étude d'une bague en or et d'une paire de fibules en argent doré livrées par deux sépultures de la nécropole mérovingienne de Louviers (Eure). Nous avons pu montrer que la bague a été fabriquée en deux parties, par des ateliers différents, et que la paire de fibules est dissymétrique, chaque élément de la paire étant de fabrication séparée.

Abstract: An analytical protocol for non-contact surface characterisation based on chromatic-coded confocal imaging was applied for the first time to the study of tool marks on jewellery items in order to identify the employed technique and type of tool as well as the goldsmith's gesture. In this study we considered decoration techniques consisting of addition of patterns by removing material or by mechanical deformation of the plaque particularly engraving, chiselling and stamping. This development was based on chased and engraved motifs produced in a goldsmith's workshop. The protocol was applied to the study of a gold finger ring and a pair of silver fire gilded fibulae found in two tombs of the Merovingian necropolis of Louviers (Eure). We could show that the finger ring consists of two parts made by two different workshops and that the pair of fibulae is dissymmetric, each element of the pair being of independent manufacture.

Mots clés : Orfèvrerie, Marques d'outils, Microtopographie, Mérovingien.

Key words: Jewellery, Tool marks, Microtopography, Merovingian.

* Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, UMR 171 CNRS – Palais du Louvre, Porte des Lions, 14, quai François-Mitterrand, 75001 Paris. (maria.guerra@culture.gouv.fr)

** Unité Toulousaine d'Archéologie et Histoire, UMR 5608 CNRS – 5 Allée Antonio Machado, 31058 Toulouse Cedex 1

1. INTRODUCTION

L'orfèvrerie ancienne assemble un large nombre d'objets dont la production varie selon la période de fabrication, et donc selon les traditions techniques, les matières premières accessibles et enfin le concept stylistique de l'époque. Pour les périodes plus récentes l'étude de l'orfèvrerie ancienne – identification des techniques de fabrication et de la provenance de la matière première – utilise des documents mais pour les périodes les plus anciennes, la grande source d'information reste l'objet trouvé en fouille.

Les étapes de fabrication d'un bijou peuvent être décrites par les diverses informations obtenues grâce à des recherches, dont l'analyse scientifique (Armbruster et Guerra, 2003; La Niece et Meeks, 2000). Un large nombre de méthodes est actuellement accessible à cette fin (Regert *et al.*, 2006), dont l'utilisation simple ou combinée permet d'obtenir les informations requises, souvent d'une forme non-invasive. Si les techniques d'analyse peuvent être classées en structurales, isotopiques et élémentaires, ce sont ces dernières, grâce à leurs possibilités analytiques et à leur non-destructivité, qui trouvent un plus grand succès dans le domaine de l'orfèvrerie. Malgré leurs possibilités, ces analyses n'apportent que des informations sur certaines techniques de fabrication ou sur la provenance de la matière première (Guerra et Calligaro, 2004). L'observation du bijou sous différentes lumières et radiations – essentiellement sous binoculaire, au microscope électronique à balayage (MEB) et par radiographie X – apporte de nouvelles informations notamment sur son montage, sa mise en forme, sa décoration, etc. (Guerra, 2006).

Un bijou en or peut être de fabrication très simple – par exemple une feuille métallique martelée ou une forme en fonte pleine – ou alors très complexe, par l'assemblage de multiples pièces, qui peuvent elles-mêmes porter des motifs ornementaux. Dans les différentes possibilités de décoration d'un bijou on peut distinguer deux groupes : sans et avec apport de matière. Ce dernier groupe comprend des éléments fabriqués à partir soit du même métal – tels le filigrane et la granulation en or – soit d'autres matériaux – tels les pierres précieuses, l'ivoire et l'émail – dans un souci de polychromie. Il ne faudra pas oublier la dorure (Oddy, 1993), qui consiste à apporter une couche d'or sur un substrat, sauf dans le cas de la *mise en couleur*. La dorure peut être partielle ou totale. Dans le premier cas elle apporte un effet polychrome de décoration, alors que dans le second cas elle devient une technique de finition, utilisée pour donner l'aspect d'or à un métal ou à un alliage moins coûteux.

Quant à la décoration sans apport de matière, elle consiste à produire des motifs sur la surface d'un bijou par estampage, gravure, ciselure, repoussé (Untrach, 1982). La gravure

est caractérisée par un enlèvement de matière sur la surface de l'objet; la ciselure et le repoussé utilisent la plasticité du matériau pour produire des motifs par enfoncement; l'estampage est utilisé pour produire des motifs répétés par frappe d'un poinçon. Les méthodes d'examen et d'analyse citées ci-dessus répondent *a priori* aux questions posées par la décoration avec apport de matière – identification du matériau, de sa provenance et de la technique d'application – mais fournissent peu d'information dans le cas de la décoration sans apport de matière. L'identification de ces techniques de décoration et des outils utilisés par l'orfèvre nécessite un processus d'acquisition de connaissances sur la morphologie des marques d'outils laissées sur la surface des objets par les différents procédés de décoration (Armbruster, 2000). Une méthode permettant de quantifier d'une façon systématique ces marques d'outils faciliterait leur classement car elle minimiserait l'intervention d'un œil expert pendant une partie du processus d'acquisition. Des méthodes optiques de caractérisation des états de surface à différentes échelles sont accessibles à cette fin.

Le but de ce travail est de montrer les premiers développements de l'analyse de la topographie de surface d'orfèvrerie, avec un dispositif STIL sans contact et sans préparation préalable de la surface avec imagerie 3D, et d'estimer ses possibilités dans le cas de bijoux mérovingiens en or et en argent doré, décorés par gravure, ciselure et estampage. Par leurs caractéristiques, ces bijoux – une bague en or et une paire de fibules en argent doré – soulèvent des questions sur le nombre d'ateliers (ou orfèvres) intervenant dans la fabrication de leurs éléments.

2. ANALYSE DE L'ÉTAT DE SURFACE

Les techniques permettant de caractériser les états de surface sont diverses (Georges *et al.*, 2004) et applicables à différents matériaux archéologiques (Newbury *et al.*, 2005; Vargiolu *et al.*, 2005a; Carcagni *et al.*, 2005); néanmoins, le MEB et l'AFM (microscope à force atomique) restent les techniques les plus utilisées dans ce domaine (avec une résolution latérale de, respectivement, 5-200 nm et 0,2-10 nm, Roblin, 1999). Ces études portent essentiellement sur l'usure et polissage de matériaux lithiques et sur des sculptures en pierre (Alvarez *et al.*, 2001, Astruc *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2005, Rots *et al.*, 2006); seules quelques publications considèrent d'autres matériaux tels les gemmes et les jades (Rosenfeld et al 2003, Sax et al 2004).

Le peu de publications scientifiques concernant la surface d'objets d'orfèvrerie se limite à estimer les dimensions des marques d'outils par observation sous loupe binoculaire ou

au MEB (Meyers, 1981 ; Wharton, 1984 ; Wicker, 1994) ou par mesure de la rugosité de surface par des méthodes optiques sans contact pour des études de corrosion de monnaies (Vargiolu *et al.*, 2005a). Dans notre travail la quantification de marques d'outils en orfèvrerie par une méthode optique mesurant l'état de surface permet d'aborder une partie de la chaîne opératoire de l'objet : sa décoration sans apport de matière.

Micromesure optique et topographie sans contact

La caractérisation géométrique de l'état de surface à l'échelle microscopique, qui détermine la rugosité et l'ondulation par rapport à une surface moyenne assimilée localement à un plan, peut être réalisée soit par des palpeurs mécaniques (avec contact) soit par des méthodes optiques (sans contact) avec différentes résolutions (Raphet, 2005). Dans le domaine de l'orfèvrerie, la préparation et déformation de la surface ainsi que la prise d'échantillon demeurent improbables dans le cas d'objets rares et fragiles. L'absence de contact reste ainsi un critère fondamental d'analyse et les méthodes optiques sans contact, mesurant les petits défauts tels les aspérités et les creux trouvent leur intérêt (Georges *et al.*, 2004).

Dans ce travail nous avons mis en œuvre pour la première fois un protocole de caractérisation de marques d'outils sur des surfaces d'or et d'argent avec un équipement de micromesure et numérisation 3D de marque STIL, qui utilise l'imagerie confocale à champ étendu et une source de lumière blanche. L'imagerie confocale (Conroy et Armstrong, 2005) est obtenue par éclatement spectral de la source de lumière pour coder l'espace de mesure, en mettant à profit le chromatisme axial des objectifs pour n'attribuer à chaque point du champ de mesure qu'une seule longueur d'onde (mode point par point) réfléchi sur la surface qui traduit l'information topographique. L'utilisation d'un champ étendu par codage chromatique de la lumière reçue évite le déplacement du capteur entre deux mesures successives. La description de l'équipement utilisé et les principes de la microscopie confocale et du codage chromatique se trouvent dans Sabban (1999). Le faisceau émis et le faisceau renvoyé par la surface sont sur le même axe et l'image d'une microsurface est reconstruite par balayage.

Les capteurs – appelés également crayons optiques – sont échangeables de façon à varier le champ et la distance de travail ainsi que la résolution verticale. Leur fréquence maximale d'acquisition est de 1 000 Hz et leur résolution axiale va de 2 à 1 500 nm selon le crayon choisi. Les capteurs et le mouvement de la table xyz, qui soutient l'objet pendant la mesure, sont contrôlés par un logiciel ; la hauteur du point

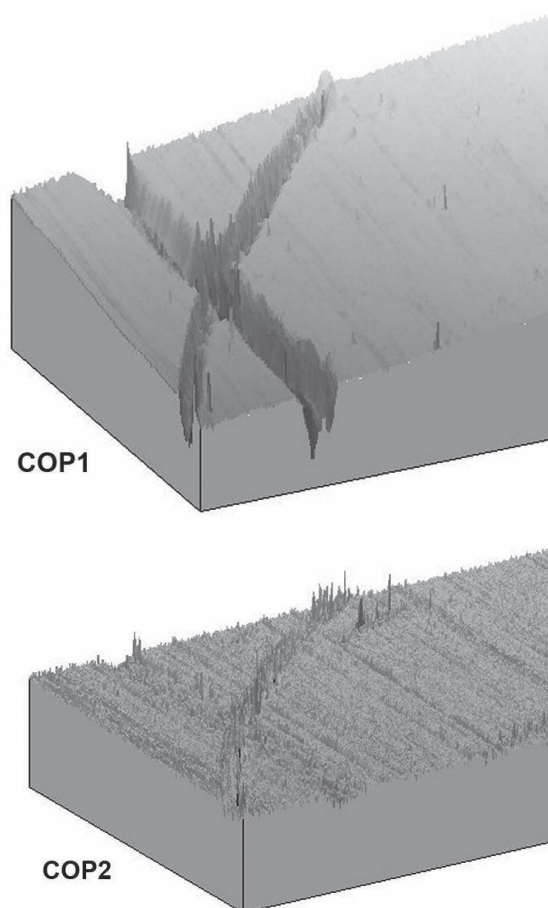
mesuré et l'intensité du faisceau lumineux renvoyé dépendent des conditions expérimentales. Un deuxième logiciel assure le traitement des données et leur conversion en vue 2D et 3D. La variation de la hauteur du point mesuré sur la surface peut être décodée en échelle colorimétrique (Carlsson et Aslund, 1987) ou en image de synthèse, et un profil sur une section choisie peut être extrait.

Le protocole analytique

Des motifs simples, essentiellement des lignes et des courbes, ont été produits par gravure et ciselure dans l'atelier de métaux modernes du C2RMF sur des plaques de 0,5 mm d'épaisseur en cuivre et en alliage d'argent avec 15 % de Cu. Les profils caractéristiques des traces d'outils laissées par chaque technique (profils extraits) ont été obtenus avec deux capteurs optiques, nommés COP1 et COP2, dont les caractéristiques sont présentées sur le tableau de la figure 1. Les paramètres d'acquisition sont choisis selon le motif : la fréquence et l'intensité du faisceau de lumière dépendent de la réflectance du matériau (98 % pour l'or pur) alors que la fréquence et les pas d'acquisition en x et en y dépendent de la profondeur et des dimensions du dessin ainsi que de la précision souhaitée pour la mesure.

La figure 1 représente en image de synthèse 3D la topographie d'un motif gravé, mesurée avec les deux capteurs optiques et une fréquence de 1 000 Hz. COP2 ne présente ni précision ni résolution verticale suffisantes pour l'étude de ce type de motif. Remarquons que la durée de la mesure varie selon les pas d'acquisition : pour COP1, 9 minutes pour des pas d'acquisition de 10 µm x 10 µm et 80 minutes pour des pas d'acquisition de 2,5 µm x 2,5 µm. Pour la quantification de certaines grandeurs les premiers pas d'acquisition sont insuffisants.

La représentation de la topographie du motif en vue 3D, en échelle colorimétrique ou en nuances de gris, indique le volume de la marque d'outil. L'extraction d'un profil permet alors de représenter la pénétration dans la matière de l'outil employé, sa forme et la technique choisie par l'orfèvre pour réaliser le motif. La figure 2 montre la différence de la forme des profils extraits pour une ligne obtenue par ciselure et l'autre par gravure avec COP1, une fréquence de 300 Hz et des pas d'acquisition de 0,05 mm x 0,1 mm. Le profil d'une ciselure se présente comme une vallée aux pentes régulières et symétriques ; la surface de l'objet (repères 2) n'est pas endommagée car il n'y a pas d'enlèvement de matière mais juste enfoncement. Le profil d'une gravure se présente comme une vallée au profil anguleux et irrégulier ; sur la surface de l'objet (repères 2) l'enlèvement de métal se traduit par un pic de débordement.



Crayons optiques	COP1	COP2
Diameter du spot (μm)	2	10
Plage de mesure (μm)	0 – 300	0 – 3000
Distance de travail (mm)	4,5	38
Résolution axiale (μm)	0,01	0,1
Precision axiale (μm)	0,1	1

Figure 1 : Représentation en image 3D de synthèse des données obtenues par mesure topographique d'un motif gravé, constitué d'une ligne droite qui croise une courbe, avec une fréquence de 1 000 Hz et les deux crayons optiques, dont les caractéristiques sont indiquées sur le tableau.

Figure 1: 3D representation in syntheses of topography data collected for an engraved motif, consisting of a straight line crossing a curve, for both optical sensors with a frequency of 1000 Hz. The characteristics of the optical sensors are shown on the table.

Remarquons que plusieurs facteurs peuvent affecter les caractéristiques des marques laissées par un outil sur une surface (Burd et Kirk, 1942). En ce qui concerne un objet d'orfèvrerie, nous devons considérer la variation de l'angle de l'outil et de la force appliquée sur l'outil ou sur le marteau,

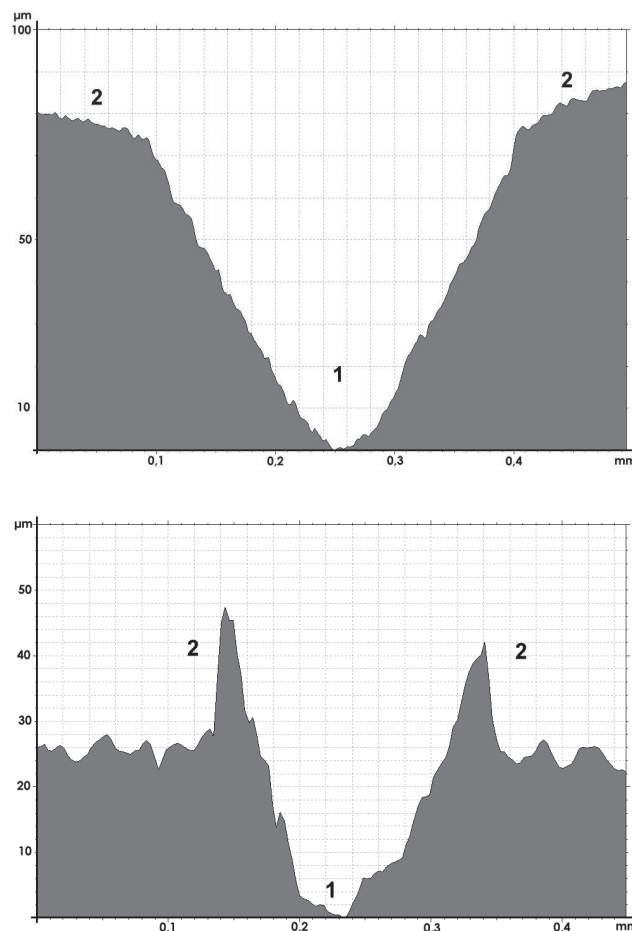


Figure 2 : Profils extraits pour la mesure topographique, avec COP1 et une fréquence de 300 Hz, de (a) une ligne ciselée, sur une surface de 0,7mm x 2,8 mm et (b) une ligne gravée, sur une surface de 0,7mm x 4 mm.

Figure 2 : Extracted profiles for data collected with COP1 and 300 Hz measurement frequency for (a) a chased line obtained for a surface of 0.7mm x 2.8 mm and (b) an engraved line for a surface of 0.7mm x 4 mm.

l'usure de la pointe de l'outil et l'éventuel cumul de débris, l'affûtage de l'outil et le nombre de points de reprise du dessin. Une attention particulière doit être apportée pendant l'observation de la surface du motif sous loupe binoculaire et éventuellement au MEB afin d'éviter autant que faire se peut les régions du motif où ces facteurs peuvent influencer les résultats de la mesure topographique.

3. ORFÈVRE MEROVINGIENNE : UN OU DEUX ATELIERS ?

Une paire de fibules en argent doré et une bague en or présentant de profondes traces d'usure et posant des questions sur

le nombre d'interventions et d'intervenants ont été étudiées pour leur décoration. En effet, la paire de fibules arborait des disparités d'un élément à l'autre de la paire, comme si chacun des éléments avait été réalisé séparément. Quant à la bague en or, elle exhibait un chaton et un anneau dont la couleur des alliages était différente. La caractérisation des marques d'outils présentes dans les différents éléments des fibules et de la bague devrait permettre d'avancer des hypothèses sur une fabrication par un même atelier ou par des ateliers distincts.

Les trois objets étudiés dans ce travail proviennent de deux tombes de classe sociale comparable, datant du ^v^e-^{vi}^e siècle AD, fouillées dans la nécropole mérovingienne de Louviers (Eure) par la SRA de Haute Normandie (Carré et Jimenez, 2008). La tombe féminine S162 a livré une paire de fibules ansées à tête triangulaire en argent doré, placée au niveau de la taille de la défunte, et la tombe masculine S191, pillée, a livré un anneau en or de type sigillaire avec inscription rétrogyre.

Les fibules ansées à tête triangulaire

Les fibules ansées à tête triangulaire de la tombe féminine S162 de Louviers sont moulées à la cire perdue. Les finitions sont apportées premièrement par polissage – les traces de lime sont visibles au MEB – et puis par une dorure complète, à l'amalgame de mercure, leur donnant à l'origine l'apparence d'objets en or. La paire de fibules présente d'importantes disparités dans les décors des deux éléments et le positif de cire ne semble pas être issu d'un même moule. La composition des alliages, déterminée par PIXE (Particle Induced X-ray Emission) avec un faisceau de protons de 3 MeV (Guerra, 2004), est aussi dissemblable pour les deux éléments de la paire (Stutz *et al.*, 2008a): 86,7% Ag, 8,8 % Cu, 1,6 % Sn, 1,5 % Pb, 0,1 % Zn pour la fibule 202 et 68,8 % Ag, 16,6 % Cu, 4,4 % Sn, 3,8 % Pb, 5,0 % Zn pour la fibule 201. La même situation est observée pour les porte-ardillons en alliage d'argent, qui présentent une concentration en Cu de 11 % pour la fibule 202 et de 32 % pour la fibule 201.

Les différences entre les éléments des paires introduisent des problématiques sur le mode opératoire des orfèvres, soit dans le cadre restreint d'un atelier soit dans le cadre élargi de la production régionale. Pour essayer d'avancer des hypothèses sur la fabrication de la paire de fibules de Louviers, nous avons procédé à la comparaison des ocelles, motifs circulaires utilisés dans la décoration des deux fibules. Nous postulons qu'un même orfèvre aurait utilisé les mêmes outils pour décorer les deux éléments d'une même paire de fibules.

Les figures 3 et 4 montrent la représentation en vue 3D de synthèse de la topographie d'ocelles sélectionnés sur les deux fibules ainsi que les profils extraits sur une ligne médiane de chaque ocelle. Les mesures ont été effectuées avec COP1, une

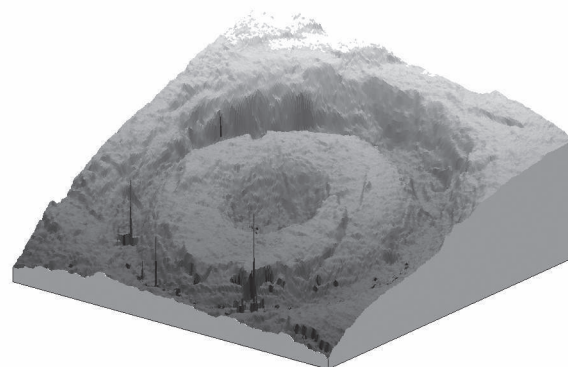
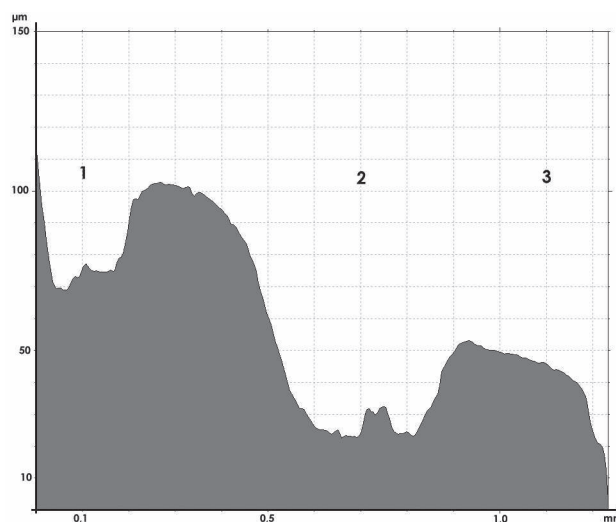


Figure 3 : Fibule 201 de la tombe S162 (photographie ©D. Bagault, C2RMF) : représentation en image 3D de synthèse de la topographie d'un ocelle et profil extrait sur une ligne médiane de l'ocelle.

Figure 3: Fibula 201 from tomb S162 (photography ©D. Bagault, C2RMF): 3D representation in syntheses of topography data collected for a circular decoration along with the extracted profile on a central line.

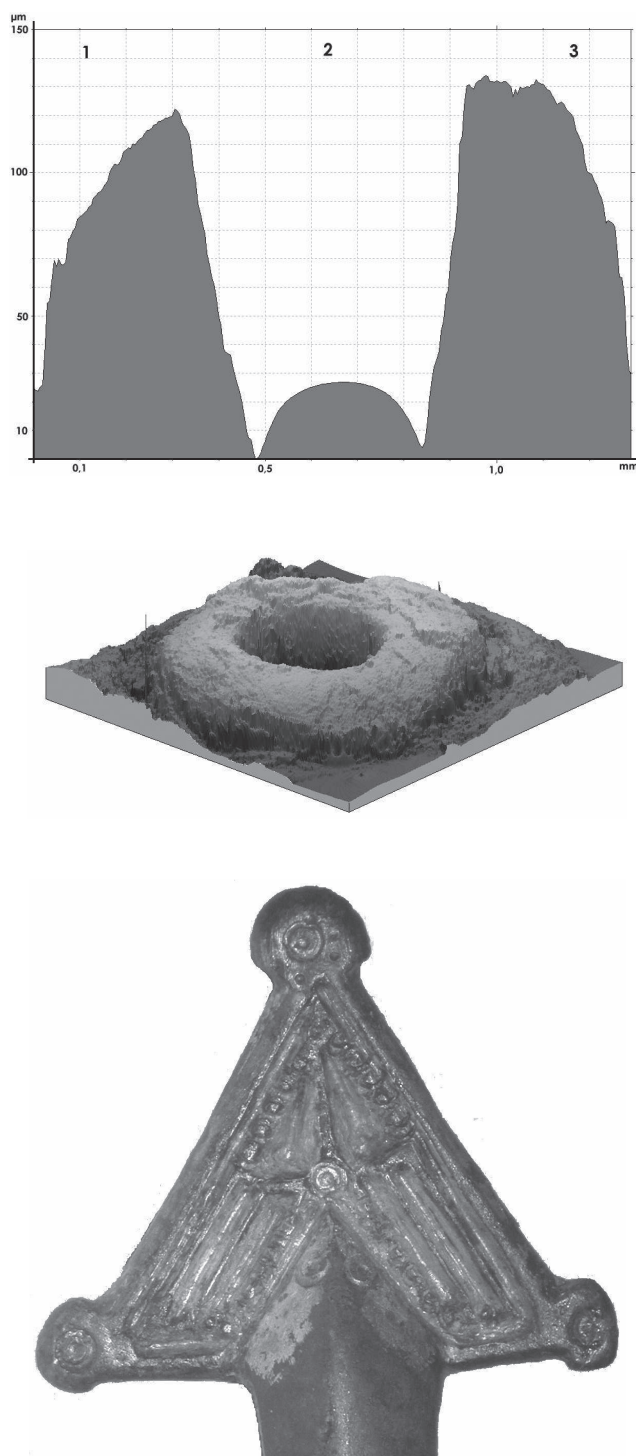


Figure 4 : Fibule 202 de la tombe S162 (photographie ©D. Bagault, C2RMF) : représentation en image 3D de synthèse de la topographie d'un ocelle et profil extrait sur une ligne médiane de l'ocelle.

Figure 4: Fibula 202 from tomb S162 (photography ©D. Bagault, C2RMF): 3D representation in syntheses of topography data collected for a circular decoration along with the extracted profile on a central line.

fréquence de 100 Hz et des pas d'acquisition de $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ pour les deux fibules. Les repères 1 et 3 représentent l'empreinte du contour des ocelles, alors que le repère 2 correspond à la partie centrale de l'ocelle. La ressemblance de ces profils est évidente. La différence de profondeur des vallées s'explique par l'état d'usure très importante des objets. Les creux sur les profils extraits mettent en évidence les dimensions de l'outil employé : par exemple, les diamètres intérieurs et extérieurs de l'ocelle correspondent directement aux diamètres de l'outil. Les dimensions régulières des marques d'outil pour les ocelles de chacun des éléments de la paire de fibules montrent qu'il s'agit d'un poinçon. Ces profils sont identiques aux profils extraits sur les marques d'outils produites en atelier moderne d'orfèvre par estampage. En moyenne, le diamètre du cercle des ocelles sur la fibule 201 est de $1,50 \pm 0,1 \text{ mm}$, alors que sur la fibule 202 il est de $1,00 \pm 0,1 \text{ mm}$; et le diamètre central du poinçon est de $0,45 \pm 0,1 \text{ mm}$ sur la fibule 201 et de $0,34 \pm 0,1 \text{ mm}$ sur la fibule 202. La comparaison des dimensions des ocelles des deux fibules est irrévocable : ces motifs ont été réalisés par un même type d'outil (un poinçon circulaire) mais de dimensions distinctes. Les données topographiques confirmeraient les soupçons soulevés par l'analyse élémentaire : une fabrication de la paire dans la même tradition orfèvre mais par des ateliers (ou orfèvres) différents.

La bague sigillaire avec inscription

La bague en or est constituée d'un anneau circulaire forgé, de section ovale, fermé par soudure sur biseau et ajustage par martelage, qui s'élargit au niveau du chaton. Il est décoré de motifs peltiformes remplis de nielle. Le chaton forme un cartouche rapporté par soudure, gravé d'une inscription rétrogyre entre deux motifs étoilés, probablement « MEL » (Garnier *et al.*, 2006), dans la tradition des bagues romaines.

L'anneau et le chaton présentent des couleurs différentes. Leur composition obtenue par PIXE est de 82,7 % Au, 13,5 % Ag et 3,5 % Cu pour l'anneau et 92,4 % Au, 5,9 % Ag et 1,2 % Cu pour le chaton (Stutz *et al.*, 2008b), c'est-à-dire utilisation d'un or jaune pour le premier alliage et d'un or jaune-rouge pour le deuxième (Rapson, 1990). Par ailleurs, le chaton présente de petites inclusions de couleur blanchâtre dont l'analyse par MEB-EDS révèle d'une part des dimensions très variables, entre 10 et 150 μm de diamètre environ, et d'autre part une composition à base de teneurs variables de Ru, Os, Ir et Pt. La présence d'inclusions de platinoïdes a été détectée par différents auteurs pour l'or alluvionnaire utilisé en Anatolie, en Europe centrale et au Moyen Orient (Meeks et Tite, 1980; Zwicker, 1995; Craddock, 2000). Le but de ce travail n'est pas de discuter la provenance de l'or; néanmoins, les inclusions étant absentes de l'anneau, ceci indiquerait l'uti-

lisation de deux ors de provenance distincte pour la fabrication des deux parties d'une même bague. Cette différence peut-elle indiquer une réparation ou une transformation de la bague par ajout d'un chaton à un certain moment de la vie de l'objet? Pour vérifier cette possibilité nous avons postulé qu'un orfèvre aurait utilisé un seul outil pour réaliser un même type de motif sur un même objet. Nous avons ensuite essayé de déterminer si l'inscription du chaton et les motifs peltiformes de l'anneau ont été faits avec les mêmes outils.

La figure 5 montre un profil extrait sur les motifs peltiformes de l'anneau, obtenu avec COP1, une fréquence de 1 000 Hz et des pas d'acquisition de $8\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$. Le tableau sur cette même figure montre l'intervalle de variation des différentes données topographiques du motif pour trois mesures différentes. La première vallée correspond à la superposition de deux passages d'un même outil. La forme des vallées est typique de la gravure au burin et l'absence de pic de débordement caractéristique de l'enlèvement de matière de la gravure n'est due qu'au polissage après gravure, avant inclusion du nielle.

En ce qui concerne l'inscription « MEL » du chaton, nous avons procédé à la mesure topographique lettre par lettre, les acquisitions étant effectuées avec COP1. La figure 6

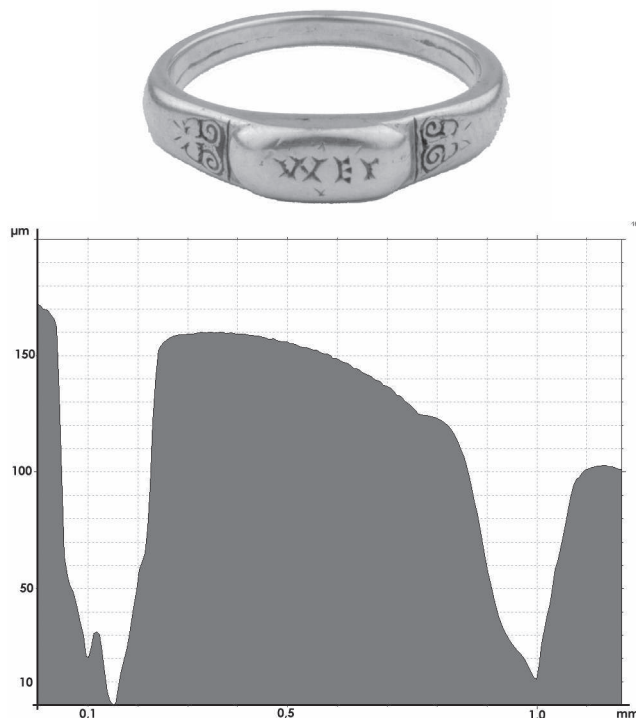


Figure 5 : Bague de la tombe S191 : photographie (© D. Bagault, C2RMF); profil extrait sur les motifs peltiformes de l'anneau et différentes dimensions du motif.

Figure 5: *Fingering of tomb S191: photography (© D. Bagault, C2RMF); extracted profile on the scroll decoration on the hoop together with the different measured dimensions.*

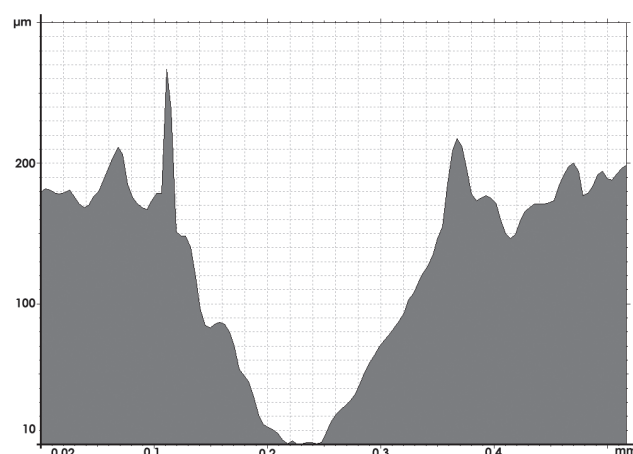
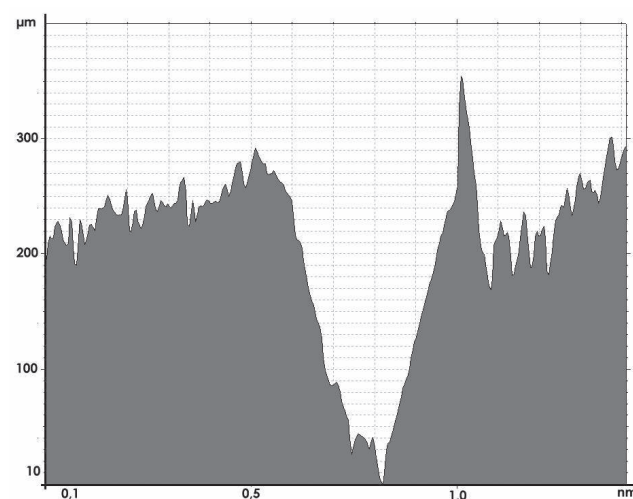
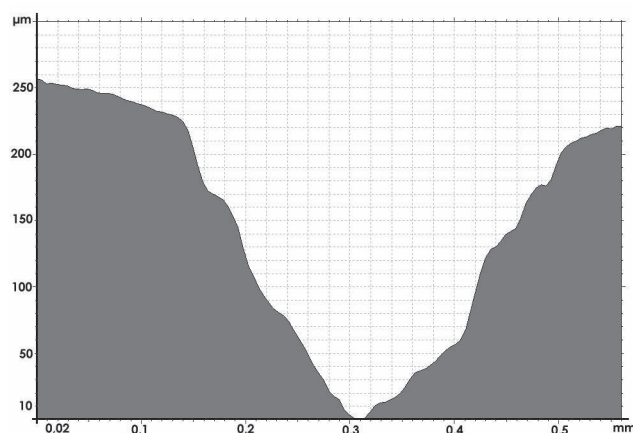


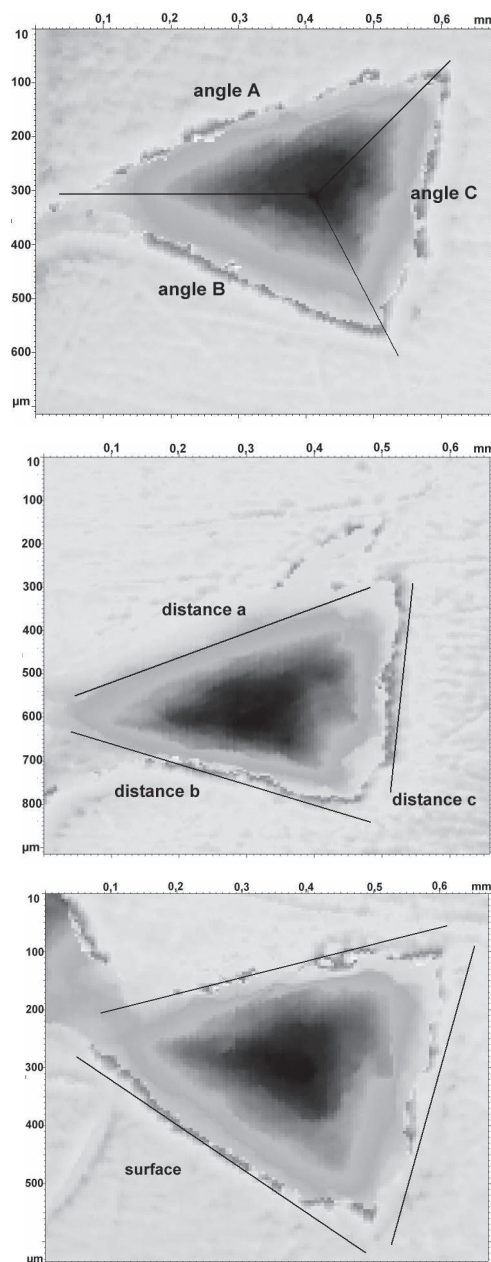
Figure 6 : Profils extraits pour les différentes lettres de l'inscription de la bague par mesure topographique de (a) la lettre « M », de (b) la lettre « L » et de (c) la barre de la lettre « E ».

Figure 6: *Extracted profiles for the different letters of the inscription on the finger-ring: (a) letter "M"; (b) letter "L"; (c) cross of letter "E".*

représente les images 3D en synthèse, avec une résolution verticale de $0,1\ \mu\text{m}$, et les profils extraits pour les lettres « M » et « L » ; les mesures topographiques sont effectuées avec une fréquence de 300 Hz et des pas d'acquisition de respectivement $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ et $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$. La forme des profils extraits indique que les deux lettres ont été gravées au burin à tête triangulaire, le pic de débordement caractéristique de l'enlèvement de matière est bas car la bague est très usée. Les dimensions moyennes de ces lettres ont été obtenues pour quatre mesures dans des régions différentes : une surface moyenne de $1,6 \times 3 \pm 0,1\ \text{mm}^2$ pour « M » et $1,3 \times 1,6\ \text{mm}^2$ pour « L » ; une profondeur moyenne de $240 \pm 10\ \mu\text{m}$ pour « M » et de $270 \pm 20\ \mu\text{m}$ pour « L » ; des pentes de $1\ 500$ et $1\ 500\ \mu\text{m}/\text{mm}$ pour « M » et de $1\ 200$ et $1\ 300\ \mu\text{m}/\text{mm}$ pour « L » ; une distance horizontale de $240\ \mu\text{m}$ pour « M » et $410\ \mu\text{m}$ pour « L ». Sur cette même figure la barre de la lettre « E », dont la topographie a été obtenue avec des pas d'acquisition de $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, montre des caractéristiques identiques : une surface moyenne de $1,1 \times 2,0 \pm 0,1\ \text{mm}^2$, une profondeur moyenne de $190 \pm 20\ \mu\text{m}$, des pentes de $1\ 430$ et $1\ 320\ \mu\text{m}/\text{mm}$ et une distance horizontale de $286\ \mu\text{m}$.

Quant aux trois triangles qui constituent la lettre « E », l'image 2D de la figure 7 indique où les différentes grandeurs sur le tableau de cette même figure ont été mesurées. Ces données topographiques semblent indiquer l'utilisation d'un poinçon triangulaire dont les dimensions moyennes sont $0,55\ \text{mm} \times 0,45\ \text{mm} \times 0,55\ \text{mm}$. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons reproduit la lettre « E » par gravure, par ciselure et par estampage, puis procédé à des mesures topographiques de surface de nos créations de façon à retrouver la forme du volume déplacé et le profil extrait typique de chacune des techniques. Ces mesures ont été effectuées avec COP1 et une fréquence de 300 Hz ainsi que des pas de mesure de $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ pour la gravure, de $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ pour la ciselure et de $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ pour l'estampage. La figure 8 montre les profils extraits pour les triangles dans le sens de la main de l'orfèvre. Dans le cas du triangle estampé, nous observons deux petits pics de débordement correspondant au déplacement de la matière sous le poinçon. Ce profil est le plus proche de celui obtenu pour les triangles de l'anneau, confirmant que la lettre « E » a été obtenue par gravure de la barre et par estampage des triangles.

Nous pouvons conclure que l'inscription « MEL » a été réalisée par gravure avec un burin sauf les triangles de la lettre « E », obtenus par estampage. La profondeur moyenne de chacune des lettres est différente : $240\ \mu\text{m}$ pour « M », $270\ \mu\text{m}$ pour « L » et $190\ \mu\text{m}$ pour la barre de « E ». Malgré ces légères différences, les pentes des profils – paramè-



		Triangle 1	Triangle 2	Triangle 3
Angles (°)	A	127.60	127.06	127.83
	B	111.40	125.51	122.03
	C	117.06	109.40	113.40
Côtés (mm)	a	0.56	0.55	0.49
	b	0.44	0.44	0.45
	c	0.52	0.51	0.48
Surface (mm ²)		0.062	0.065	0.056

Figure 7 : Représentation en image 2D de la topographie des trois triangles de la lettre « E ». Les dimensions mesurées pour chacun des triangles sont indiquées sur les images et les valeurs présentées sur le tableau.

Figure 7: 2D representation of the topography of the three triangles of letter « E » showing the different measured dimensions presented on the table.

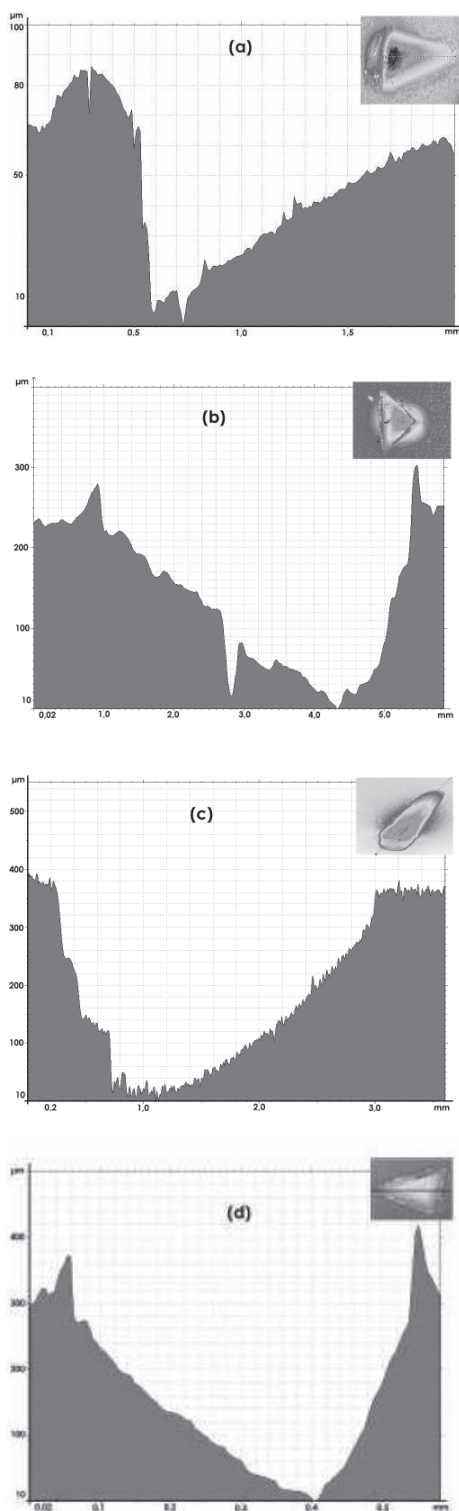


Figure 8 : Profils extraits pour les triangles reproduits en atelier d'orfèvre (a) par gravure, (b) par estampage et (c) par ciselure, ainsi que pour (d) un des triangles de la lettre « E ».

Figure 8: Extracted profiles for the triangles produced at the goldsmith's workshop by (a) engraving, (b) stamping and (c) chiselling as well as (d) one of the triangles of letter "E".

tre directement lié à la forme de l'outil – restent proches, entre 1 140 et 1 500 $\mu\text{m}/\text{mm}$. Cette différence n'étant liée qu'à l'évolution du geste de l'orfèvre, qui devient plus « sûr » avec la progression du motif. Nous pouvons ainsi proposer l'utilisation d'un seul burin triangulaire pour produire les trois lettres. L'équilibre du motif et la petite profondeur de pénétration mesurée pour la barre de la lettre « E » suggèrent que celle-ci ait été la première à avoir été apportée par l'orfèvre. Si nous gardons cette logique, alors c'est la lettre « M » et puis la lettre « L » qui se suivent. Pour assurer l'uniformité de la lettre « E » les triangles sont alors estampés avec un poinçon triangulaire dont la dimension a été estimée à 0,55 mm x 0,55 mm x 0,45 mm.

En comparaison, les motifs peltiformes de l'anneau sont bien moins profondes et les pentes des profils extraits bien plus réduites, variant entre 870 et 1 100 $\mu\text{m}/\text{mm}$. Ces motifs ont été aussi obtenus avec un burin triangulaire, mais de dimensions différentes du précédent. Le fait que les alliages et les motifs ornementaux de la bague présentent des dissemblances semble confirmer notre suggestion : l'objet a été transformé, peut-être suite à une cassure, dans un autre atelier, par rajout d'un cartouche inscrit.

4. CONCLUSION

Les premières mesures topographiques effectuées sur des trois objets d'orfèvrerie en or et en argent doré fabriqués en Gaule pendant l'Antiquité tardive, montrent l'apport des méthodes de caractérisation des états de surface à l'étude des techniques de décoration sans apport de matière. Un premier protocole pour l'analyse de la topographie de la surface de bijoux par une méthode optique sans contact et sans préparation préalable de la surface, méthode non-invasive nécessaire à l'étude d'objets rares et fragiles, a permis de différencier clairement les techniques de gravure, de ciselure et d'estampage par comparaison de la forme des profils extraits sur des motifs simples produits en atelier moderne d'orfèvrerie. Les données topographiques des motifs et les paramètres liés aux profils extraits dans les régions choisies des motifs, définissent la forme de l'outil, la technique et le geste de l'orfèvre.

L'application de ce protocole à deux types d'objets distincts – une paire de fibules en argent doré et une bague en or – mais présentant des indices de fabrication séparée ou de modifications postérieures à leur production, a montré l'emploi de techniques d'orfèvrerie identiques mais l'utilisation d'outils distincts. A partir des données topographiques nous avons pu confirmer la fabrication séparée des deux éléments de la paire de fibules, prévue à partir de leur composition

élémentaire disparate. Quant à la bague en or, la reproduction en atelier de la lettre « E » de l'inscription et les données topographiques des motifs ont permis d'avancer des hypothèses sur les techniques utilisées, la forme de l'outil choisi, et conclure sur une fabrication séparée de l'anneau et du chaton. Grâce à une étude approfondie de l'inscription du cartouche de la bague et à la reproduction de son inscription en atelier moderne d'orfèvrerie en utilisant plusieurs techniques, nous avons encore pu proposer la séquence chronologique du tracé du mot « MEL ».

Ces premiers résultats ouvrent de nouvelles perspectives d'étude des modes opératoires des ateliers d'orfèvre, du point de vue régional et temporel. Les informations obtenues par quantification des traces d'outils, grâce à l'analyse de la topographie de surface de bijoux, viennent s'ajouter aux indices livrés par l'analyse élémentaire des alliages et par l'examen des objets, permettant ainsi de confirmer ou infirmer certaines hypothèses sur leur fabrication. Il faudra néanmoins remarquer l'importance pour cette première étude des motifs « étalon » produits en atelier moderne d'orfèvrerie.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Françoise Carré, conservateur de la SRA de Haute-Normandie, pour avoir mis à leur disposition les objets trouvés à Louviers et, au C2RMF, à Dominique Bagault, Jean-Jacques Ezrati et l'équipe AGLAE pour leur soutien technique.

Bibliographie

- ALVAREZ, M., FIORE, D., FAVRET, E. et GUERRA, R. C., 2001. The use of lithic artefacts for making rock art engravings, *J. Archaeol. Sciences*, 28, 5, 457-464.
- ARMBRUSTER, B. R. et GUERRA, M. F., 2003. L'or archéologique une approche interdisciplinaire, *Technè*, 18, p. 57-62.
- ARMBRUSTER, B. R., 2000. *Goldschmiedekunst und Bronzetechnik auf der Iberischen Halbinsel während der Atlantischen Bronzezeit*, Monographies Instrumentum, 15, Editions M. Mergoïl.
- ASTRUC, L., VARGIOLU, R. et ZAHOUANI, H., 2003. Wear assessments of prehistoric instruments, *Wear*, 255, p. 341-347.
- BURD, D. Q. et KIRK, P. L., 1942. Tool mark. Factors involved in their comparison and use as evidence, *J. Criminal Law and Criminology*, 32, 6, p. 679-686.
- CARCAGNI, P., DAFFARA, C., FONTANA, R., GAMBINO, M. C., MASTROIANNI, M., MAZZOTTA, C., PAMPALONI, E. et PEZZATI L., 2005. Optical micro-profilometry for archaeology, in SALIMBENI et R., PEZZATI, L. (dir.). *Proceedings of SPIE Optical Methods for Arts and Archaeology*, p. 118-128.
- CARLSSON, K. et ASLUND, N., 1987. Confocal imaging for 3-D digital microscopy, *Applied Optics*, 26, 16, p. 3232-3238.
- CARRÉ, F. et JIMENEZ, F. (dir.), 2008. *Louviers (Eure) au haut Moyen Age : Découvertes anciennes et fouilles récentes de la rue du Mûrier*, Mémoires de l'AFAM XVIII.
- CONROY, M. et ARMSTRONG, J., 2005. A comparison of surface metrology techniques, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 13, p. 458-465.
- CRADDOCK, P. T., 2000. Historical survey of gold refining, in Ramage, A., Craddock (dir.), *Kings Croesus' Gold, The Trustees of the British Museum*, London, p. 27-71.
- GARNIER, J.-P., GUERRA, M.-F., CARRÉ, F. et JIMENEZ, F., 2006. À propos de l'inscription d'une bague de tradition romaine trouvée à Louviers (Eure), *Bulletin de la Société française de numismatique*, 61, 7, p. 208-212.
- GEORGES, J.-M., ZAHOUANI, H. et VARGIOLU, R., 2004. Divers visages de la tribologie, *Dossiers de l'Archéologie*, 290, p. 4-11.
- GUERRA, M. F. et CALLIGARO, T., 2004. The analysis of gold: manufacture technologies and provenance of the metal, *Measurement in Science and Technology*, 14, p. 1527-1537.
- GUERRA, M.-F., 2004. Fingerprinting ancient gold with proton beams of different energies, *Nucl. Instrum. and Methods*, B 226, p. 185-198.
- GUERRA, M.-F., 2006. *Etruscan gold jewellery pastiches of the Campana's collection revealed by scientific analysis*, L'Erma Di Bretschneider, Rome, *Studia Archeologica*, 150, p. 103-128.
- LA NIECE, S. et MEEKS N., 2000. Diversity of goldsmithing traditions in the Americas and the Old World, in McEwan, C. (dir.). *Precolumbian Gold, technology, style and iconography*, Londres, British Museum Press, p. 220-239.
- LU, P. J., YAO, N., SO, J.F., HARLOW, G. E., LU, J. F., WANG G. F. et CHAIKIN, P. M., 2005. The earliest use of corundum and diamond in prehistoric China, *Archaeometry*, 47, 1, p. 1-12.
- MEEKS, N. et TITE, M., 1980. The analysis of platinum-group element inclusions in gold antiquities, *J. Archaeol. Sciences*, 7, 3, p. 267-275.
- MEYERS, P., 1981. Three silver objects from Thrace: a technical examination, *Metropolitan Museum Journal*, 16, p. 49-54.
- NEWBURY, B., NOTIS, M. R. et CARGILL, G. S., 2005. Optical profilometry as a non-destructive technique to quantify engraving on an Arsenius Astrolabe, in Vandiver, P., Mass, J. et Murray, A. (dir.), *Materials Issues in Art and Archaeology VII*, OO1.4.
- ODDY, A., 1993. Gilding of metals in the Old World, in LA NIECE, S. et CRADDOCK, P. (dir.), *Metal plating and patination*, London, Butterworth-Heinemann, p. 171-181.
- RAPHET, B., 2005. État de surface, *Techniques de l'Ingénieur*, M1231.
- RAPSON, R. W., 1990. The metallurgy of coloured carat gold alloys, *Gold Bull.*, 23, 4, p. 128-133.

- REGERT, M., GUERRA, M.-F. et REICHE, I., 2006. Analyses physico-chimiques des matériaux du patrimoine culturel, *Techniques de l'Ingénieur*, p. 3780 et p. 3781.
- ROBLIN, G., 1999. Microscopie, *Techniques de l'Ingénieur*, traité Mesures et Contrôle R 6 710, p. 1-13.
- ROSENFELD, A., DVORACHEK, M. et AMORAI-STARK, S., 2003. Roman wheel-cut engraving, dyeing and painting microquartz gemstones, *J. Archaeol. Sciences*, 30, 2, p. 227-238.
- ROTS, V., PIRNAY, L., PIRSON, P. et BAUDOUX, O., 2006. Blind tests shed light on possibilities and limitations for identifying stone tool prehension and hafting, *J. Archaeol. Sciences*, 33, p. 935-952.
- SABBAN, J.-C., 1999. L'optique accélère le contrôle d'états de surface, *Mesures*, 719, p. 85-90.
- SAX, M., MEEKS, N., MICHAELSON, C. et MIDDLETON, A., 2004. The identification of carving techniques on Chinese jade, *J. Archaeol. Sciences*, 31, p. 1413-1428.
- STUTZ, F., BELL, B. et GUERRA, M.-F., 2008a. Petites fibules ansées à tête triangulaire : Étude technique, in Carré, F. et Jimenez, F. (dir.), p. 115-119.
- STUTZ, F., GUERRA, M.-F., ESQUÈS, C. et BELL, B., 2008b. Bague en or avec inscription, in Carré, F. et Jimenez, F. (dir.), p. 111-114.
- UNTRACH, O., 1982. *Jewelry Concepts and Technology*, New York, Doubleday.
- VARGIOLU, R., ZAHOUANI, H., CHASTEL, J. et PLISKA, P., 2005a. Bronzes protohistoriques de Saint-Priest, Les Feuilly (Rhône): approche tribologique des techniques de fabrication, *Bull. Groupe Travail Intern. sur la paléométab. des cuivres et des minéraux associés*, 4, p. 12-16.
- VARGIOLU, R., ZAHOUANI, H. et BLOT, J.-Y., 2005b. Analyse de la topographie des pièces de monnaie du San Pedro de Alcântara, *Rev. Portuguesa de Arqueologia*, 8, 1, p. 433-458.
- WHARTON, G., 1984. Technical examination of Renaissance medals, *J. Amer. Inst. Conserv.*, 23, 2, p. 88-100.
- WICKER, N. L., 1994. On the trail of the elusive goldsmith: tracing individual style and workshop characteristics in migration period metalwork, *Gesta*, 33, 1, p. 65-70.
- ZWICKER, U., 1995. An investigation of PGE metals in ancient coinage, in Oddy, W. A. et Cowell, M. R. (dir.), *Metallurgy in Numismatics* 4, Royal Numismatic Society SP30, 15-34.